

На правах рукописи



Поликарпов Алексей Филиппович

Теплоперенос и дрейф разреженных газов в каналах

01.04.14 — Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург - 2011

Работа выполнена на кафедре общей и молекулярной физики ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Черняк Владимир Григорьевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Селезнев
Владимир Дмитриевич

кандидат физико-математических наук,
доцент Болтачев Грэй Шамилевич

Ведущая организация: Институт теплофизики УрО РАН

Защита состоится 10 ноября 2011 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А. М. Горького» (УрГУ).

12.05.2011 УрГУ реорганизован в форме присоединения к ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина 51, комн. 248

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Автореферат разослан «__» октября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.286.01,
доктор физ.-мат. наук



Кудреватых Н. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Диссертационная работа является фундаментальным исследованием, направленным на решение актуальной проблемы физической кинетики газов – выявление механизмов и возможностей стимулирования процессов переноса в разреженных газах, управление этими процессами в зависимости от газокинетических, аккомодационных, теплофизических, оптических и диссипативных свойств газа и обтекаемой им поверхности.

Интерес ученых и инженеров-практиков к явлениям тепломассопереноса в разреженных газах вблизи межфазной границы обусловлен интенсивным развитием наукоемких отраслей промышленности, таких как создание вакуумной и авиационно-космической техники, потребностями ядерной энергетики и новых химических технологий. Решение важнейших задач энергосбережения и экологии воздушного бассейна невозможно без понимания механизмов и количественных оценок интенсивности процессов тепломассообмена в газах.

В настоящее время теория процессов переноса, обусловленных слабой пространственной неоднородностью термодинамических параметров газа – давления, температуры и концентрации – в основном разработана. Немногочисленные теоретические исследования нелинейных процессов тепломассопереноса в ограниченном газе основаны, как правило, на численном решении кинетического уравнения для одного значения или узкого интервала значений давления и температуры. В этом смысле они носят фрагментарный характер. Очевидно, для понимания физических механизмов нелинейного тепломассопереноса в газе, особенностей пространственного распределения термодинамических величин и потоков, а также эволюции этих распределений при изменении значений определяющих параметров необходимо провести расчеты макроскопических величин в широком диапазоне значений этих параметров.

Возможность внешнего воздействия на процессы переноса в ограниченном газе до настоящего времени практически не изучалась. Но это ключевой вопрос теории и практики управления неравновесными процессами в газах. Большие перспективы в его решении связаны с развитием нового направления физической кинетики – лазерной газокинетики. Исследование механизмов и количественное описание явлений переноса, индуцированных

резонансным взаимодействием оптического излучения с молекулами газа, является актуальной составляющей общей проблемы теплопереноса в газах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 09-01-00052, Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF), грант RUX0-000005-EK-06. Результаты диссертационной работы вошли в отчет проекта "Теплоперенос в разреженных газах и аэрозолях" аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011)".

Цель работы состоит в том, чтобы изучить механизмы и количественно описать нелинейные и светоиндуцированные процессы теплопереноса в разреженных газах в каналах в широком диапазоне значений числа Кнудсена и других определяющих параметров.

Задачи работы

Для достижения цели диссертационной работы были поставлены следующие задачи:

- изучить нелинейные эффекты в сильнонеравновесном газе при различных числах Кнудсена (Kn – отношение средней длины свободного пробега молекул к характерному линейному размеру системы) на основе решения задачи Куэтта;
- оптимизировать метод дискретных скоростей решения модельных кинетических уравнений для прикладных задач динамики разреженного газа, добившись необходимой точности при сокращении времени вычислений;
- методом прямого численного решения системы кинетических уравнений для функций распределения возбужденных и невозбужденных молекул получить профили светоиндуцированных теплового потока и дрейфа газа в капилляре при различных значениях числа Кнудсена;
- вычислить кинетические коэффициенты, характеризующие средние по сечению капилляра светоиндуцированные потоки тепла и газа в зависимости от значений числа Кнудсена, частотного параметра (отношение частоты радиационного распада возбужденного уровня к частоте межмолекулярных столкновений) и коэффициента зеркально-диффузного рассеяния молекул на поверхности капилляра;
- выяснить влияние пространственной неоднородности интенсивности света в поперечном сечении пучка на светоиндуцированный теплоперенос в газе через капилляр в широком диапазоне значений определяющих параметров.

- сравнить теорию с экспериментальными данными по светоиндуцированному бароэффекту; получить численные оценки сечений столкновений и коэффициентов аккомодации возбужденных молекул.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

- на основе аппроксимирующих кинетических уравнений третьего порядка в нелинейной постановке решена задача о совместном теплопереносе и сдвиговом движении разреженного газа в задаче Куэтта в широком диапазоне значений определяющих параметров. В частности, показано, что: (а) при переходе от промежуточного к свободномолекулярному режиму скорость движения газа вблизи «горячей» пластины при определенных условиях изменяет свое направление на противоположное, (б) при некоторой скорости движения пластин температура газа за счет диссипации энергии оказывается выше температуры «горячей» пластины, так что поток тепла направлен из объема газа в сторону «горячей» пластины;

- рассчитаны профили светоиндуцированных теплового и массового потоков газа в капилляре в широком диапазоне значений числа Кнудсена, частотного параметра и коэффициента зеркально-диффузного отражения невозбужденных частиц. Получено, что скорость дрейфа газа вблизи поверхности капилляра может быть больше, чем в ядре потока;

- рассчитаны усредненные по сечению капилляра кинетические коэффициенты, характеризующие аккомодационный и столкновительный механизмы светоиндуцированного теплового потока и дрейфа газа в широком диапазоне значений определяющих параметров. Показано, что направление столкновительной составляющей скорости дрейфа определяется не только знаками отстройки частоты излучения от резонанса и разности сечений столкновений возбужденных и невозбужденных молекул, но также и давлением газа в капилляре;

- изучено влияние неоднородности интенсивности светового пучка в поперечном сечении капилляра на светоиндуцированный тепломассоперенос. Установлено, что если радиус пучка света составляет менее трети радиуса капилляра, то светоиндуцированный тепломассоперенос отсутствует.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты:

- расширяют существующие представления о процессах тепломассопереноса в газах вблизи межфазных границ: стимулируют

дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования явлений переноса в разреженных газах;

- открывают новые возможности для исследования неравновесных свойств газов, в частности, являются теоретической базой для экспериментального определения параметров взаимодействия возбужденных частиц с поверхностями твердых тел и сечений столкновений возбужденных и невозбужденных частиц;

- могут быть использованы в инженерной практике для расчета и проектирования вакуумных и микро-электромеханических систем;

- составляют теоретическую основу для разработки принципиально новых методов разделения газовых смесей и изотопов, основанных на резонансном поглощении оптического излучения молекулами газа селективно по их скоростям.

На защиту выносятся:

1. Результаты анализа физических механизмов и численного расчета нелинейных процессов тепломассопереноса в разреженном газе в проблеме Куэтта.

2. Результаты расчета кинетических коэффициентов, характеризующих светоиндуцированный тепломассоперенос однокомпонентного газа в капилляре в зависимости от числа Кнудсена, отношения частоты радиационного распада возбужденного уровня частиц к частоте молекулярных столкновений, сечений рассеяния и коэффициентов аккомодации возбужденных и невозбужденных частиц, расстройки частоты излучения относительно резонанса, степени неоднородности распределения интенсивности излучения по поперечному сечению капилляра.

Достоверность результатов исследования гарантируется высокой точностью прямого численного решения кинетических уравнений, выполнением фундаментальных физических законов, прежде всего, законов сохранения массы, импульса и энергии, и согласием с экспериментальными данными.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были представлены на международной конференции по динамике разреженного газа (RGD-27), Пасифик Грив, США, 2010, второй международной конференции Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer (MNHMT 2009), Шанхай, Китай, 2009, международной конференции Microfluidics (MicroFlu'10), Тулуза, Франция, 2010.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в трех статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключался в постановке задачи, проведении численных расчетов всех рассмотренных задач, обсуждении и интерпретации полученных результатов, а также подготовке статей и докладов на конференциях. Результаты совместных работ представлены в диссертации с согласия соавторов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем составляет 136 страниц, включая 90 рисунков, 33 таблицы. Список использованных источников содержит 77 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели и задачи работы, показаны научная новизна и практическая ценность результатов, выносимых на защиту, описана структура диссертации

Первая глава носит в основном обзорно-справочный характер. Приводятся известные кинетические уравнения с аппроксимирующими интегралами столкновений для однокомпонентного газа (БГК, S-модель и эллипсоидальная модель) и бинарной газовой смеси (модель Мак-Кормакка), обсуждаются их достоинства и недостатки. Дается краткий обзор существующих моделей граничных условий для функции распределения молекулярных скоростей. Излагаются основные идеи метода дискретных скоростей решения кинетических уравнений применительно к граничным задачам динамики разреженного газа.

Во второй главе проведено исследование сильнонеравновесного тепло- и массопереноса в однокомпонентном газе на примере задачи Куэтта. Несмотря на большое количество публикаций по проблеме, результаты, полученные в нелинейном приближении, носят фрагментарный характер. В основном исследовались независимо теплоперенос и сдвиговое течение при некоторых значениях определяющих параметров. Совместный тепломассоперенос практически не рассматривался. По этой причине некоторые явления остались неизученными. Аналитические формулы получены лишь для свободномолекулярного режима. Некоторые формулы по сдвиговому течению газа получены при малых числах Кнудсена в барнеттовском приближении [1].

Очевидно, для понимания физических механизмов нелинейного теплопереноса в газе, особенностей распределения термодинамических величин и потоков в зазоре между пластинами, а также эволюции этих распределений при изменении определяющих параметров необходимо провести расчеты в широком диапазоне значений этих параметров - скорости движения пластин, перепада температур между ними и параметра разреженности газа.

Рассматривались процессы тепло- и массопереноса в газе, заключенном между двумя параллельными пластинами, расположенными на расстоянии H друг от друга, движущимися в противоположные стороны со скоростью u_w и поддерживаемыми при температурах T_1 и T_2 .

На основе решения аппроксимирующих кинетических уравнений второго (БГК) и третьего (S-модель) порядков методом дискретных ординат рассчитывались безразмерные макроскопические величины (плотность n , температура T , скорость u_x , напряжение p_{xy} , нормальный q_y и продольный q_x тепловые потоки) в широком диапазоне чисел Кнудсена при различных значениях разности температур пластин и скорости их движения. В качестве характерных параметров, по которым проводилось обезразмеривание физических величин, принимались средняя температура пластин $T_0 = 0.5(T_1 + T_2)$, соответствующие ей числовая плотность газа n_0 , давление p_0 и наиболее вероятная скорость молекул \bar{v} . Вводились следующие безразмерные величины:

$$y' = y/H, \quad T' = T/T_0, \quad \vec{q}' = \vec{q}/(p_0\bar{v}), \quad u'_w = u_w/\bar{v}$$

В дальнейшем штрихи над безразмерными величинами будут опущены.

В качестве граничных условий принималась модель зеркально-диффузного отражения.

На основе полученных численных результатов установлена аналитическая зависимость макроскопических величин от скорости движения пластин при любой степени разреженности газа: макроскопическая скорость движения газа и касательное напряжение пропорциональны скорости движения пластин, относительные изменения числовой плотности газа, температуры и поперечного потока тепла пропорциональны квадрату скорости движения пластин.

Установлено, что при достаточно больших скоростях движения пластин ($u_w \geq 0.5$) возникают специфические нелинейные эффекты. В частности, за счет работы внутренних напряжений заметно повышается температура газа в зазоре между пластинами, имеющими

равные температуры. Это стимулирует нормальный к пластинам перенос тепла.

Установлено, что величины нормального и тангенциального тепловых потоков максимальны для промежуточных чисел Кнудсена ($Kn \approx 1$). При переходе к режиму сплошной среды ($Kn \rightarrow 0$) величины потоков тепла уменьшаются пропорционально Kn , что для нормального потока тепла соответствует закону теплопроводности Фурье.

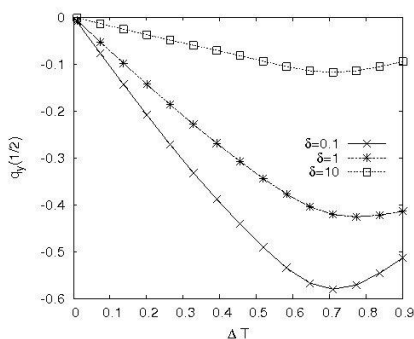


Рис. 1. Тепловой поток между неподвижными пластинами в зависимости от величины разности температур пластин.

На рис.1 показана зависимость поперечного теплового потока от разности температур пластин при различных значениях параметра разреженности $\delta \sim Kn^{-1}$. Видно, что эта зависимость остается линейной вплоть до отношения температур, приблизительно равного трем, при любой степени разреженности газа.

Получено, что в случае различных температур пластин при переходе от промежуточного к

свободномолекулярному режиму скорость движения газа вблизи «горячей» пластины изменяет свое направление на противоположное. Это связано с тем, что фактор разности плотности газа вблизи пластин начинает доминировать над фактором разности значений коэффициента вязкости. Из рис.2а видно, что скорость газа вблизи горячей пластины меняет знак при $\delta = 0.1$ и $\Delta T = 0.3$.

На рис. 2б приведена зависимость отношения скоростей движения газа на «холодной» и «горячей» пластинах от разности температур пластин при различных значениях параметра разреженности. Например, при $\delta=0.1$ эти скорости различаются в десятки раз. Чем больше величина параметра разреженности δ , тем меньше различие скоростей. В режиме сплошной среды ($\delta \rightarrow \infty$) скорости движения газа на пластинах одинаковы и равны скоростям пластин, т.е. выполняется граничное условие «прилипания». Этот результат соответствует гидродинамическому решению задачи Куэтта на основе уравнения Стокса. Как следует из гидродинамической

теории, скорость движения газа в режиме сплошной среды не зависит от его вязкости.

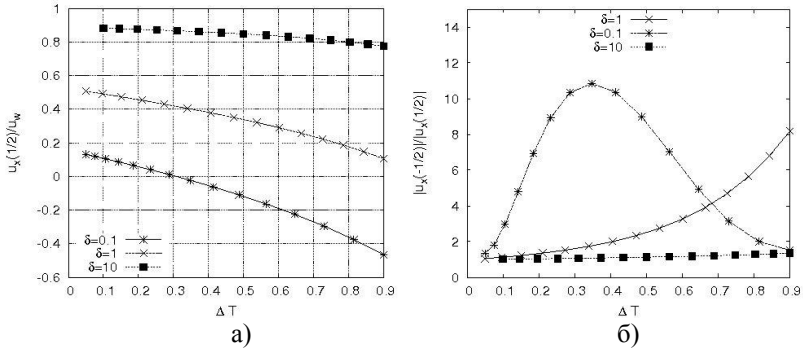


Рис. 2. Значение скорости газа на верхней пластине в зависимости от перепада температур.

Показано, что при фиксированных значениях параметра разреженности и разности температур пластин, существует такое значение скорости движения пластин u_w^{inv} , при котором температура газа в зазоре за счет работы внутренних напряжений становится больше температуры «горячей» пластины. При этом поперечный тепловой поток вблизи нее меняет свой знак на противоположный, т.е. направлен в сторону «горячей» пластины.

На рис. 3 показана зависимость распределения температуры и

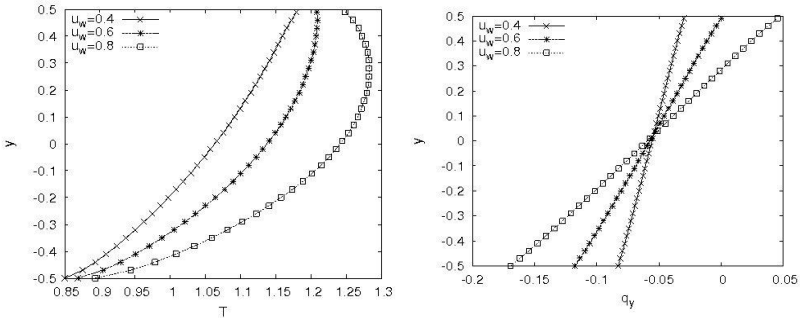


Рис. 3. Температура и поперечный поток тепла при $\Delta T = 0.2$, $\delta = 10$ и значениях скорости пластин $u_w = 0.4, 0.6, 0.8$.

поперечного теплового потока от скорости движения пластин при $\delta = 10$, $T_2/T_1 = 1.5$. Видно, что при этих значениях параметров $u_w^{inv} \approx 0.6$.

Разработан программный код метода дискретных скоростей для решения аппроксимирующих кинетических уравнений, апробированный на задаче Куэтта. Полученные результаты согласуются с законами сохранения импульса и энергии, что свидетельствует о надежности метода и, как следствие, их достоверности.

На рис. 4 показано сравнение результатов численного расчета теплового потока с экспериментальными данными для аргона [2]. Получено хорошее согласие теории для S-модели с экспериментом. Для модели БГК расхождение с экспериментом составило около 10 %.

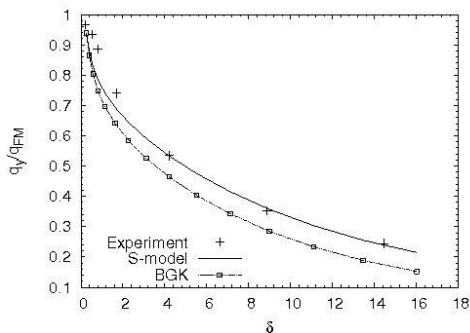


Рис. 4. Сравнение рассчитанных потоков тепла с экспериментальными данными (q_{FM} — поток тепла в свободномолекулярном режиме).

В третьей главе изучаются процессы теплопереноса и дрейфа однокомпонентного газа в капилляре, обусловленные резонансным поглощением оптического излучения атомами селективно по их скоростям.

Обсуждаются физические механизмы светоиндуцированного дрейфа газа (СИД) и теплопереноса (СИТ): объемный, аккомодационный и столкновительный. Первый механизм связан с различием частот столкновений возбужденных частиц с молекулами буферного газа, второй — с различием коэффициентов зеркально-диффузного отражения возбужденных и невозбужденных частиц, третий — с различием сечений столкновений возбужденных и невозбужденных частиц. Отметим, что в силу закона сохранения импульса СИД однокомпонентного газа возможен лишь вблизи межфазных границ.

Частицы газа считались двухуровневыми. Известно, что для описания резонансных явлений такая модель является наиболее оправданной. В этом случае газовую среду можно рассматривать как бинарную смесь газов, молекулы которых имеют одинаковые массы, но разные сечения столкновений. При этом обмен частицами между компонентами происходит в результате радиационного распада

возбужденного уровня и индуцированных переходов. Для такой модельной системы кинетические уравнения для функции распределения невозбужденных и возбужденных частиц удовлетворяют уравнениям Больцмана с дополнительными членами, описывающими взаимодействие молекул с электромагнитным излучением [3].

Исследуется тепломассоперенос в однокомпонентном газе через капилляр радиуса r_0 под действием электромагнитного излучения, частота которого близка к частоте электронного (для атомов) или вращательно-колебательного (для молекул) перехода частиц из основного состояния n в возбужденное m . При этом предполагается, что длина капилляра значительно больше его радиуса. Основная цель заключалась в вычислении потоков массы газа J , тепла q , а также их усредненных по сечению капилляра значений $\langle J \rangle$, $\langle q \rangle$, в зависимости от значений определяющих параметров.

Столкновения молекул с поверхностью капилляра предполагались упругими. В качестве граничных условий принималась модель Максвелла, причем коэффициенты зеркально-диффузного отражения возбужденных и невозбужденных частиц различны.

Установлен набор параметров, определяющих светоиндуцированный тепломассоперенос в газе через капилляр: параметр разреженности газа $R = \sqrt{\pi}/(2Kn)$, частотный параметр Γ_m (отношение частоты радиационного распада возбужденного уровня частиц к частоте молекулярных столкновений), сечения рассеяния возбужденных σ_m и невозбужденных σ_n частиц, коэффициенты аккомодации возбужденных ε_m и невозбужденных ε_n частиц, расстройка частоты излучения относительно резонанса Ω , параметр уширения y_0 (отношение однородной полуширины линии поглощения к доплеровскому уширению) и параметр неоднородности a (отношение радиуса капилляра к радиусу светового пучка).

Основные предположения:

1. Рассматривалось слабонеравновесное состояние газа. Критерий линеаризации задачи подробно обсуждается в диссертационной работе.
2. Интегралы столкновений кинетических уравнений аппроксимировались моделью третьего порядка в форме Мак-Кормакка [4]
3. Коэффициенты аккомодации частиц в возбужденном и невозбужденном состояниях слабо различаются, $|\varepsilon_n - \varepsilon_m| \ll 1$;

4. Относительное различие сечений столкновений возбужденных и невозбужденных частиц мало, $|(\sigma_n - \sigma_m)/\sigma_n| \ll 1$.

Условия 3 и 4 позволяют разделить аккомодационный и столкновительный механизмы тепломассопереноса:

$$J = \frac{n\Gamma_m r_0}{2\sqrt{\pi}} \left((G_{11}\chi_1 + G_{13}\chi_3) \Delta\varepsilon + (G_{21}\chi_1 + G_{23}\chi_3) \frac{\Delta\sigma}{\sigma_n} \right),$$

$$q = \frac{p\Gamma_m r_0}{2\sqrt{\pi}} \left((Q_{11}\chi_1 + Q_{13}\chi_3) \Delta\varepsilon + (Q_{21}\chi_1 + Q_{23}\chi_3) \frac{\Delta\sigma}{\sigma_n} \right),$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_n - \varepsilon_m, \quad \Delta\sigma = \sigma_n - \sigma_m,$$

где G_{li} и Q_{li} – кинетические коэффициенты, определяющие аккомодационную составляющую СИД и СИТ, G_{2i} и Q_{2i} – кинетические коэффициенты, определяющие столкновительную составляющую светоиндуцированного тепломассопереноса, n – числовая плотность молекул, p – давление газа, χ_1 и χ_3 – интегральные параметры насыщения, зависящие от параметров уширения и расстройки. Существенно также, что линеаризация кинетических уравнений по $\Delta\varepsilon$ и $\Delta\sigma/\sigma_n$ приводит к сокращению числа варьируемых параметров, от которых зависят кинетические коэффициенты.

На основе численного решения линеаризованных газокинетических уравнений методом дискретных скоростей получены профили потоков массы газа и тепла в зависимости от параметра разреженности R .

Показано, что столкновительная составляющая СИД не соответствует традиционным гидродинамическим представлениям о движении газа в каналах. Так, в почти свободномолекулярном режиме ($R \leq 0.1$) скорость газа вблизи стенки капилляра больше, чем в ядре потока (вогнутый профиль). Интересна эволюция профиля столкновительной составляющей скорости потока газа G_{21} при переходе от свободномолекулярного к гидродинамическому режиму (рис. 5). Пока параметр разреженности R мал, величина G_{21} слабо зависит от радиальной координаты r . В промежуточном режиме при $0.1 < R < 5$ структура столкновительного дрейфа усложняется. Вблизи оси капилляра формируется «ядро» потока, направленное в одну сторону, а в пристеночном слое газ движется в противоположном направлении. Наличие противотока связано с тем, что при промежуточных значениях R поток возбужденных частиц в пристеночной области больше, чем поток невозбужденных частиц, а около оси капилляра наоборот.

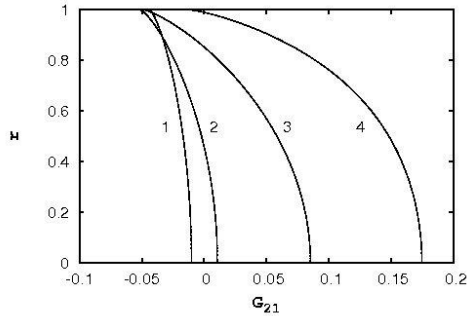


Рис.5. Профиль безразмерной скорости дрейфа газа в зависимости от параметра разреженности R при $\Gamma_{mn} = 0.01$ и $\varepsilon_n = 1$ (1 – $R=0.05$, 2 – 0.1 , 3 – 0.3 , 4 – 3)

Рассчитаны усредненные по сечению капилляра значения потоков массы газа и тепла в зависимости от частотного параметра в широком диапазоне значений параметра разреженности. Уменьшение величин кинетических коэффициентов, ответственных за поверхностные СИД и СИТ, при увеличении частотного параметра Γ_{mn} и любом фиксированном значении R можно объяснить уменьшением относительного количества возбужденных частиц, испытывающих столкновения с невозбужденными частицами и со стенками капилляра. Так, с увеличением параметра Γ_{mn} от 0.01 до 10 при промежуточных значениях параметра разреженности ($R \approx 1$) величины коэффициентов $\langle G_{11} \rangle$, $\langle G_{13} \rangle$, $\langle Q_{11} \rangle$, $\langle Q_{13} \rangle$ уменьшаются приблизительно в 5 раз. Следует также отметить, что результаты численных расчетов данной работы при $\Gamma_{mn} = 0.01$ находятся в удовлетворительном согласии с результатами работы [5], полученными в приближении $\Gamma_{mn} \ll 1$.

Коэффициенты $\langle G_{11} \rangle$, $\langle G_{13} \rangle$, $\langle Q_{11} \rangle$, $\langle Q_{13} \rangle$, характеризующие поверхностный механизм соответственно дрейфа газа и теплопереноса, являются знакопостоянными функциями параметра разреженности R . Поэтому направления поверхностных составляющих СИД и СИТ определяются только знаками разности коэффициентов аккомодации невозбужденных и возбужденных частиц $\Delta\varepsilon$ и отстройки частоты излучения от центра линии поглощения Ω . Например, если $\Delta\varepsilon > 0$, то в случае неоднородного уширения ($\Gamma \ll k\bar{v}$) направление поверхностной составляющей СИД при $\Omega > 0$ совпадает с

направлением распространения излучения, а при $\Omega < 0$ противоположно ему.

Коэффициент $\langle G_{21} \rangle$ (рис. 6) является знакопеременной функцией параметра разреженности R . Величина $\langle G_{21} \rangle$ принимает минимальное значение при $R \approx 0.07$, максимальное – при $R \approx 1 \div 3$, изменяет свой знак на противоположный в промежуточном режиме при $0.3 < R < 0.7$ в зависимости от значения параметра Γ_{mn} . Это означает, что направление столкновительной составляющей светоиндуцированного дрейфа определяется не только знаками отстройки Ω и разности $\Delta\sigma$ эффективных диаметров возбужденных и невозбужденных молекул, но также давлением газа в капилляре. В промежуточном режиме имеет место инверсия направления газового потока.

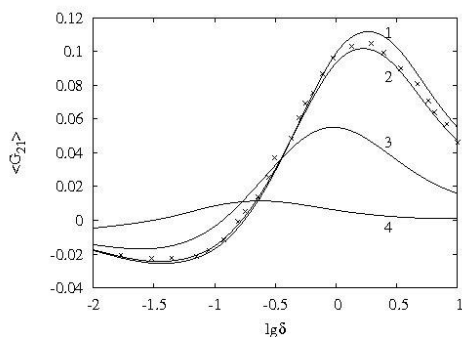


Рис. 6. Усредненный по сечению капилляра кинетический коэффициент G_{21} как функция параметра разреженности газа R при $\varepsilon_n=1$ и различных значениях частотного параметра Γ_{mn} (1- $\Gamma_{mn}=0.01$, 2 - 0.1, 3 - 1.4 - 10), крестики – результаты работы [5].

Исследована зависимость потоков массы газа и тепла от степени разреженности газа при фиксированном значении частотного параметра и различных значениях коэффициента зеркально-диффузного отражения молекул в основном состоянии. Установлено, что уменьшение коэффициента зеркально-диффузного отражения частиц в основном состоянии приводит к увеличению значений потоков массы газа и тепла в промежуточном и свободномолекулярном режимах ($R \leq 1$). В режиме со скольжением кинетические

коэффициенты практически не зависят от значения коэффициента зеркально-диффузного отражения.

Установлено, что величины теплового потока и дрейфа газа максимальны, если параметр расстройки ($\Omega/k\bar{v}$ – отношение расстройки к доплеровскому уширению) приблизительно равен единице. Эффект становится неизмеримо малым при $\Omega/k\bar{v} \leq 2.5$, так как нарушается условие резонанса.

Исследована зависимость величин потоков от параметра неоднородности a . Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка задавалось гауссовым. Установлено, что при увеличении параметра неоднородности величины потоков массы газа и тепла уменьшаются приблизительно по экспоненциальному закону, $\exp(-a^2)$. Если радиус пучка света составляет менее трети радиуса капилляра, то светоиндуцированный тепломассоперенос практически отсутствует.

Светоиндуцированный дрейф газа экспериментально изучается по бароэффекту. Суть этого явления заключается в возникновении перепада давления газа на концах закрытого капилляра при распространении вдоль него резонансного оптического излучения. В стационарном состоянии светоиндуцированный дрейф скомпенсирован пуазейлевским потоком, так что средняя по сечению скорость газа в капилляре равна нулю.

На рис. 7 показано сравнение результатов расчета светоиндуцированного бароэффекта с экспериментальными данными

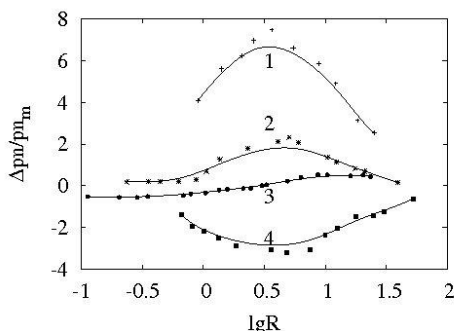


Рис. 7. Сравнение теории с экспериментом по светоиндуцированному бароэффекту для переходов 1 – P(24,13), 2 – Q(12,3), 3 – R(4,3), 4 – R(31, 9)

для молекул CH_3F [6]. Во всем экспериментально исследованном диапазоне значений параметра разреженности имеет место удовлетворительное согласие результатов расчета с экспериментальными данными.

Из требования наилучшего согласия теории с экспериментом восстановлены разность коэффициентов зеркально-диффузного отражения и относительная разность эффективных сечений столкновений возбужденных и невозбужденных частиц. Результаты приведены в Таблице.

Таблица

| Параметры $\Delta\varepsilon$ и $\Delta\sigma/\sigma_n$ | | | | |
|---|--------|--------------|-------------|--------------|
| Переход | R(4,3) | R(31,9) | Q(12,3) | P(24,13) |
| $\Delta\varepsilon, 10^{-3}$ | -1.89 | -(2.42–2.89) | 4.72 – 4.86 | -(2.24–3.12) |
| $\Delta\sigma/\sigma_n, 10^{-3}$ | 9.47 | -(48.8–58) | -(98–104) | -(60.1–82.5) |

Значение $\Delta\varepsilon$ для перехода R(4,3) близко к значению $\Delta\varepsilon = -(1.9 \pm 0.3) \times 10^{-3}$, полученному на основе обработки экспериментальных данных в работе [6].

Основные результаты и выводы работы

1. В нелинейной постановке решена задача Куэтта. Установлено, что при любых значениях параметра разреженности числовая плотность газа, температура и поперечный тепловой поток пропорциональны квадрату скорости движения пластин, а скорость движения газа и касательное напряжение – линейные функции скорости движения пластин.

2. Существует такое соотношение между разностью температур пластин и скоростью их движения, при котором температура газа в результате работы внутренних напряжений и соответствующей диссипации энергии оказывается больше температуры «горячей» пластины. Как следствие, поперечный тепловой поток направлен из объема газа в сторону «горячей» пластины.

3. При определенной разности температур пластин в почти свободномолекулярном режиме скорость газа вблизи «горячей» пластины изменяет свое направление на противоположное. Это связано с тем, что фактор распределения плотности молекул газа становится

превалирующим относительно фактора различия вязкости газа вблизи пластин.

4. Решена задача о светоиндуцированном тепломассопереносе разреженного газа в капилляре. Установлено, что величины теплового потока и дрейфа газа максимальны, если параметр расстройки ($\Omega/k\bar{v}$ – отношение расстройки к доплеровскому уширению) приблизительно равен единице. Эффект становится неизмеримо малым при $\Omega/k\bar{v} \leq 2.5$, так как нарушается условие резонанса.

5. Профиль столкновительной составляющей СИД не соответствует существующим представлениям о движении газа вблизи межфазной границы. В почти свободномолекулярном режиме скорость дрейфа газа вблизи стенки капилляра больше, чем в ядре потока (вогнутый профиль).

6. С увеличением частотного параметра величины кинетических коэффициентов, определяющих тепловой поток и дрейф газа в капилляре, уменьшаются. Это связано с уменьшением относительного количества возбужденных частиц, испытывающих столкновения с невозбужденными частицами и со стенками капилляра;

7. Направление аккомодационной составляющей СИД определяется знаками отстройки и разности коэффициентов зеркально-диффузного отражения возбужденных и невозбужденных молекул. Направление столкновительной составляющей СИД определяется не только знаками отстройки и разности эффективных диаметров возбужденных и невозбужденных молекул, но также давлением газа в капилляре. В промежуточном режиме столкновительный дрейф газа изменяет свое направление на противоположное.

8. При увеличении неоднородности распределения интенсивности излучения по сечению капилляра величины кинетических коэффициентов, характеризующих светоиндуцированный тепломассоперенос, уменьшаются. Процессы переноса практически отсутствуют, если радиус пучка света составляет менее трети радиуса капилляра.

Список использованных источников

1. Marques W., Kremer G. M., Sharipov F. M. Couette flow with slip and jump boundary conditions// Continuum Mechanics and Thermodynamics-2000.-vol. 12, issue 6.-P. 379-386.
2. Teagan W. P., Springer G. S. Heat-transfer and density-distribution measurments between parallel plates in the transitional regime//The Physics of Fluids – 1968. - vol. 11, 3. - P. 497—506.
3. Rautian S. G., Shalagin A. M. Kinetics Problems of Non-Linear Spectroscopy - Amsterdam: North-Holland, 1991 - 454 p.
4. McCormack F. J. Construction of linearized kinetic models for gaseous mixtures and molecular gases // Physics of Fluids - 1973.-vol. 12, issue 16. - P. 2095--2105.
5. Чермянинов И. В., Черняк В. Г., Вилисова Е. А. Светоиндуцированные процессы тепломассопереноса однокомпонентного газа в капилляре // Журнал экспериментальной и теоретической физики — 2007. - том 132, 3. - С. 577—588.
6. Hoogeveen R. W. M., van der Meer G. J., Hermans L. J. F. Surface light-induced drift of CH₃F// Physical Review Letters – 1990. - vol. 42, 11. - P. , 6471 – 6479.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Черняк В. Г., Поликарпов А. Ф. Светоиндуцированный теломассоперенос в газах через капилляр при неоднородном распределении интенсивности по сечению светового пучка. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 139, вып. 1. – С. 15-25.
2. Chernyak V. G., Polikarpov A. P. Light Induced Drift and Heat Transfer of One-Component Gas in a Capillary. // Journal of Statistical Physics. – 2010. – V. 140, issue 3. – P. 504-517.
3. Черняк В. Г., Поликарпов А. Ф. Нелинейные эффекты в газах в

проблеме Куэтта.// Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2010 – т. 137, вып. 1. – С. 165-176.

Другие публикации:

1. Chernyak, V. G., Polikarpov, A. P. The Light-Induced Drift and Heat Transfer of Rarefied Gas in a Capillary. Book of abstracts. 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics. July 10—15, 2010. Asilomar Conference Grounds, Pacific Grove, California, USA.
2. Graur, I.A., Polikarpov, A. P., Chernyak, V. G. Heat and Mass Transfer of Rarefied Gas in the Couette Problem. Book of abstracts. 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics. July 10—15, 2010. Asilomar Conference Grounds, Pacific Grove, California, USA.
3. Polikarpov, A, Graur, I. Heat Transfer Problem Between Two Coaxial Cylinders With Large Temperature and Radius Ratios, MicroFlu-267, Proceedings of 2nd European Conference on Microfluidics (MicroFlu'10). December 8-10, 2010. Toulouse, France.
4. Graur, I. and Polikarpov, A., Kinetic simulation of heat transfer in micro flow. //ASME 2009 Second International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer (MNHMT2009) December 18–21, 2009. Shanghai, China. Volume 1. In Paper no. MNHMT2009-18113 P. 31-39 (doi:10.1115/MNHMT2009-18113)

Подписано в печать 19.09.2011. Формат 60x84 1/16

Гарнитура «Times». Усл. печ. л. 1,16

Тираж 100 экз. Заказ № 1057

Отпечатано в типографии ИПЦ УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4